

УДК 621.316

ОГРАНИЧЕНИЕ ТОКА НАГРУЗКИ ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ С РАЗНЫМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ ТРАНСФОРМАЦИИ

В.А. Зайцев, О.А. Зайцева

Обеспечение бесперебойного электроснабжения, особенно при использовании АСКУЭ [1], требует в случае необходимости параллельного включения силовых трансформаторов подстанции. Если при этом трансформаторы имеют разные коэффициенты трансформации (что всегда объективно присутствует), в трансформаторах возникают уравнительные токи. Ток в каждом трансформаторе является векторной суммой уравнительного тока и части тока нагрузки, приходящегося на данный трансформатор. Рассмотрим два параллельно включенных трансформатора, имеющих одинаковые параметры, за исключением коэффициентов трансформации. В результате действия уравнительного тока один из трансформаторов будет перегружен, другой – недогружен. Величины этих токов в соответствии с [2] можно найти из соотношений:

$$P_I = P_{нг} + 2I_{нг}I_{ycos}(\Delta\varphi) + P_y, \quad (1)$$

$$P_{II} = P_{нг} - 2I_{нг}I_{ycos}(\Delta\varphi) + P_y, \quad (2)$$

$$\Delta\varphi = \varphi_K - \varphi_{нг},$$

$$I_y = I_n(\Delta n, \%) / (2u_K, \%),$$

$$I_{нг} = 0,5I_{нг0},$$

где: I_I, I_{II} – токи I-го и II-го трансформаторов соответственно;

$I_{нг}$ – часть тока нагрузки, приходящаяся на каждый трансформатор;

$I_{нг0}$ – ток общий нагрузки трансформаторов;

I_y – уравнительный ток;

I_n номинальный ток трансформаторов;

$\Delta n, \%$ - разность коэффициентов трансформации трансформаторов;

$u_K, \%$ - напряжение короткого замыкания трансформаторов;

φ_K – угол сдвига фаз между напряжением и током в опыте короткого замыкания;

$\varphi_{нг}$ – угол сдвига фаз между напряжением и током в нагрузке.

Для большинства силовых трансформаторов

$$u_K, \% = 4,5 \dots 5,5; \varphi_K = 70 \dots 80^\circ.$$

При стандартной нагрузке $\varphi_{нг} = 37^\circ$, поэтому можно принять:

$$u_K = 5\%, \cos(\Delta\varphi) = 0,6. \quad (3)$$

Нормируя к номинальному току I_n токи трансформаторов I_I, I_{II} и общую нагрузку $I_{нг0}$, имеем:

$$I_{нг0} = 2, I_{нг} = I_n = 1.$$

Используя значения (3) и принимая коэффициент трансформации I-го трансформатора меньше, чем II-го, получаем уравнения:

$$I_I = \sqrt{(1 + 0,12(\Delta n, \%) + 0,01(\Delta n, \%)^2)},$$

$$I_{II} = \sqrt{(2 + 0,02(\Delta n, \%)^2 - P_I)}.$$

По данным уравнениям рассчитаны нормированные значения токов трансформаторов и их перегрузка (недогрузка) в процентах. Результаты расчетов приведены в таблице 1.

Таблица 1

Нормированные токи трансформаторов и их перегрузка (недогрузка)

$\Delta n, \%$		0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
I_I	-	1	1,03	1,063	1,097	1,131	1,167	1,20	1,24	1,281	1,32	1,36
	%	0	3,1	6,3	9,7	13,1	16,7	20,4	24,2	28,1	32,0	36,0
I_{II}	-	1	0,971	0,943	0,917	0,895	0,874	0,855	0,838	0,824	0,814	0,806
	%	0	-2,9	-5,7	-8,3	-10,5	-12,6	-14,5	-16,2	-17,6	-18,6	-19,4

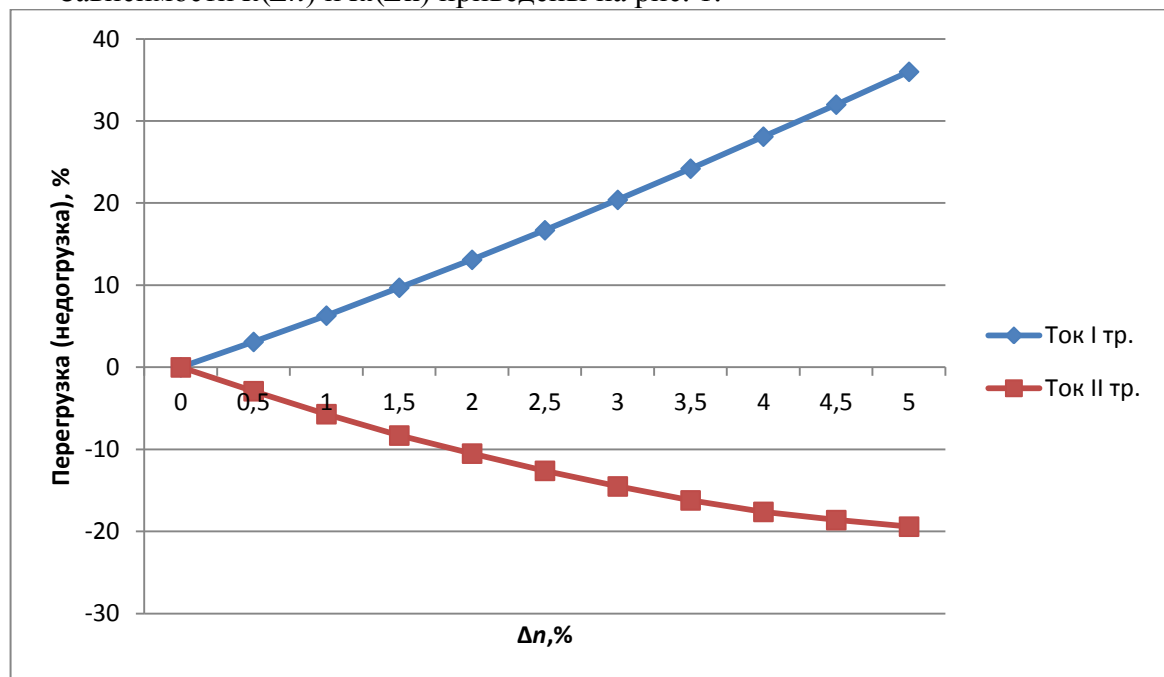
Зависимости $I_I(\Delta n)$ и $I_{II}(\Delta n)$ приведены на рис. 1.

Рис.1. Токи параллельно включенных трансформаторов с разными коэффициентами трансформации

Рассмотрение графиков показывает, что даже при небольших Δn (единицы процентов) I-й трансформатор испытывает значительную перегрузку (десятки процентов), что недопустимо. При этом II-й трансформатор сильно недогружен. Чтобы исключить перегрузку I-го трансформатора, необходимо снизить ток нагрузки до значений, при которых ток I-го трансформатора не будет превышать его номинального тока, т.е. $I_I \leq I_n$. Необходимую степень снижения тока общей нагрузки найдем следующим образом.

Выражая из (1) ток $I_{нг}$, получаем:

$$I_{нг} = \sqrt{(P_y \cos^2(\Delta\varphi) - P_y + P_i) - I_y \cos(\Delta\varphi)}.$$

Нормируя токи к I_n , используя основное тригонометрическое тождество и условия (3), находим нормированный ток нагрузки при $I_I = I_n = 1$:

$$I_{нг} = \sqrt{(1 - 0,0064(\Delta n, \%)^2) - 0,06(\Delta n, \%)} \quad (4)$$

Решая совместно (1) и (2), получаем, что ток II-го трансформатора в нормированном виде равен:

$$I_{II} = \sqrt{(2P_{нг} + 0,02(\Delta n, \%)^2 - 1)}. \quad (5)$$

По уравнениям (4) и (5) рассчитаны нормированные значения общего тока нагрузки и II-го (недогруженного) трансформатора, а также процентные значения недогрузки упомянутых величин. Результаты расчетов приведены в таблице 2.

Таблица 2

Нормированный ток нагрузки и нормированный ток недогруженного трансформатора

$\Delta n, \%$	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
----------------	---	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

$I_{нг}$	-	1	0,97	0,937	0,903	0,867	0,83	0,791	0,75	0,707	0,663	0,617
	%	0	-3,0	-6,3	-9,7	-13,3	-17	-20,9	-25	-29,3	-33,7	-38,3
I_{II}	-	1	0,942	0,884	0,822	0,763	0,709	0,657	0,608	0,566	0,534	0,511
	%	0	-5,8	-11,9	-17,8	-23,7	-29,1	-34,3	-39,2	-43,4	-46,6	-48,9

На рис. 2 показаны зависимости $I_{нг}(\Delta n)$ и $I_{II}(\Delta n)$, построенные по данным таблицы 2.

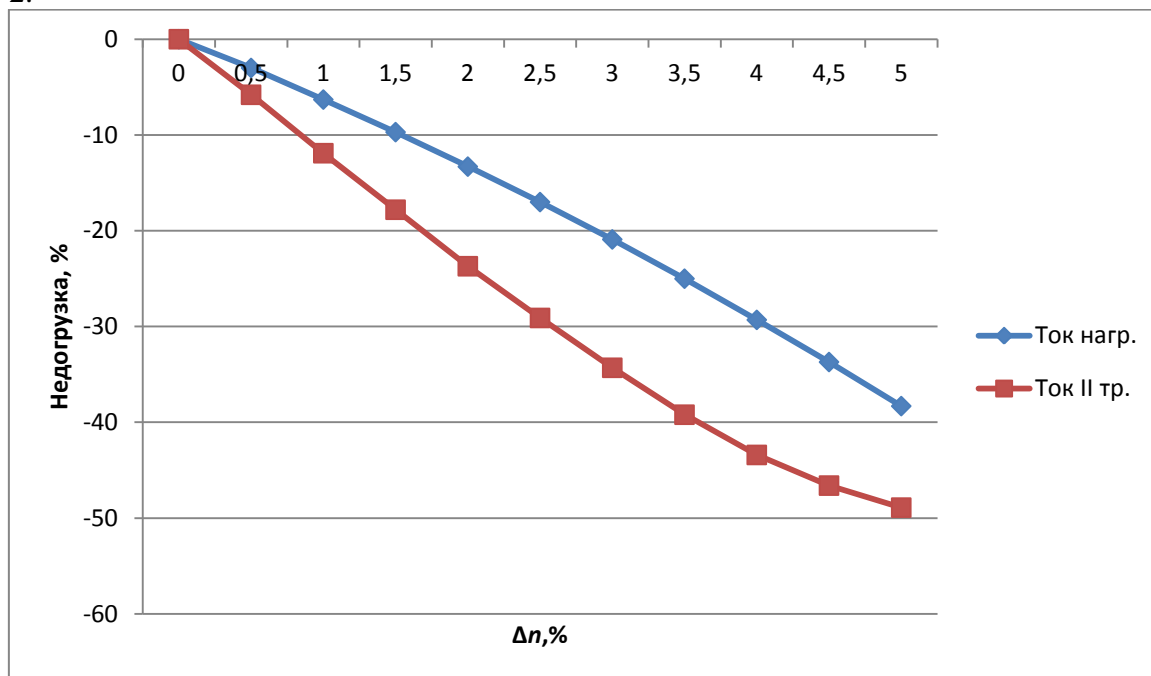


Рис. 2. Снижение тока нагрузки при отсутствии перегрузки трансформаторов

Рассмотрение графиков рис. 2 показывает, что при Δn , составляющих единицы процентов, ток общей нагрузки трансформаторов необходимо снижать на десятки процентов, чтобы исключить перегрузку трансформатора, имеющего меньший коэффициент трансформации, при этом трансформатор с большим коэффициентом трансформации будет значительно недогружен, его ток может достигать до 50% от номинального.

Библиографический список

1. Киселев А. Н. Использование АСКУЭ для оценки энергетической эффективности потребителей с нелинейной нагрузкой/ А. Н. Киселев // Вестник Тверского государственного технического университета. 2014. №1. С. 92 – 94.
2. Вольдек А. И. Электрические машины. Учебник для вузов/А. И. Вольдек. Спб.: Энергия, 1978. 832 с.

Принято к печати 20.03.2015

